

推动高端制造装备嬗变的“背后力量”

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“高性能数字制造装备的基础研究”

■本报记者 张双虎

在高端制造装备领域，“中国制造”面临严峻挑战，如何“卧薪尝胆”建立“产品自信”，进而树立“文化自信”，是时代大课题。

在国家自然科学基金创新研究群体项目持续资助下，中国工程院院士、华中科技大学党委书记邵新宇团队十多年来，在高端制造装备领域深耕细作，从“基于几何的制造”到“基于物理的制造”，再到“基于信息的智能化制造”，一步一个脚印地迈入高性能数字制造的领先方阵。

项目执行过程中，群体成员获国家科学技术进步奖一等奖等国家奖励6项，两位成员被评为院士。今年3月，该项目结题验收时获评优秀。今天，我们走近这支推动中国高端制造装备嬗变的“背后力量”，看看这个优秀群体是如何“炼”成的。



2008年，团队成员在一起筹备申请创新群体项目。

受访者供图

焊接技术：从“纽扣”到“拉链”

如果你是个老司机，可能会发现以前车身和车顶结合处，不少品牌都有的“装饰条”不知何时消失了。

这其实并非厂家省掉了装饰条，而是焊接工艺进步了。在汽车焊装生产线上，传统的点焊技术不但让焊接处凹凸不平，而且存在焊接缝隙，因此焊接后需涂胶并装上装饰条。

“类似我们穿的衣服，点焊就像扣纽扣，激光焊接像拉拉链。”邵新宇告诉《中国科学报》，“纽扣之间不可避免存在空隙，同样，点焊的焊点间也有缝隙，其刚度、强度、密封性、表面光滑度等无法和激光焊接相比。”

但激光焊接集成了材料、工艺、控制、装配等多项技术，是复杂的光、机、电一体化系统，门槛极高。由于我国这方面基础研究薄弱，关键技术、成套装备与系统集成上的核心技术缺乏，长期以来，我国的激光焊接装备高度依赖进口。

“激光焊接是高能束加工，激光要聚焦到车身拼缝中心，焦点和拼缝中心的重合度小于0.1毫米。”邵新宇说，

“轿车的顶盖焊缝2米左右，商务车达到4米以上，对0.6毫米至1.5毫米厚，又有一定弧度的车身板来说，焊接到中间时后面已经变形，需要用机器视觉、测量跟踪、力学补偿等手段来保证焊接精度。”

经过十多年基础研究和“产学研用”攻关，该群体首创了形性可控的三维薄壁曲面车身激光搭接填丝熔焊工艺与成套装备，将拼缝公差由0.3毫米提高到0.8毫米，单条焊缝长度由1.8米提高到4.5米。他们发明了曲线切割图形刀补测控方法，研发了拼焊束流能量均衡调控技术，在国际上首次研发曲线不等厚板激光切焊一体化复合工艺与成套装备，研发了白车身激光焊接、不等厚板曲线拼焊、激光非穿透精密切割等一系列成套装备，一举突破国外垄断。

“车身顶盖一侧围激光焊接生产线目前已达到43秒/辆，为全球最高节拍。”邵新宇说，“该成套工艺装备屡次在国际知名装备公司的竞争中获胜，已在一汽红旗、上汽通用、东风雪铁龙、广汽本田、江淮、江铃（福特）等

龙头车企中广泛应用。”

该成果获2014年度湖北省科技进步奖特等奖和2015年国家科学技术进步奖一等奖。在此基础上，他们进一步攻克了新能源汽车铝合金车身高效激光焊接难题，研发了我国首条铝合金车身激光焊接线，在上汽通用凯迪拉克、蔚来ES8/ES6等生产中应用。

高端制造：从“几何”到“物理”

“中国制造正经历从‘基于几何的制造’向‘基于物理的制造’的转变。”邵新宇说，“目前，还要同步向‘基于信息的智能化制造’迈进。”

邵新宇解释称，我国在工业化进程中，由于历史原因，制造领域只能先向别人学习，以前制造业主要关注尺寸公差、表面粗糙度等外部几何特征，只要样子符合要求就可以了，没有注意到样子的微观组织、力学特性等内在性能。因此，做出的产品表面上看差不多，但真正用起来却发现稳定性、耐久性、可靠性不足。

“这是我们以前仿造国外产品‘形

似神不似’的根本原因。”邵新宇说。

“所以，现在要真正深入下去，去研究对象的微观组织结构、材料特性，看看它在加工过程中发生了什么性状改变。”该团队成员之一、华中科技大学机械科学与工程学院院长尹周平说，“高端制造、高水制造，最后比拼的就是性能。”

邵新宇认为，所有“卡脖子”问题追根溯源都是基础研究做得不够扎实。这也造成我们制造业“依葫芦画葫芦”都画不好，更别谈“依葫芦画瓢”了。

通常企业只注重参数、节拍、质量体系的控制，没有能力也没有兴趣从基础原理入手解决问题，而这恰恰是大学和科研机构擅长的领域。

“比如航空发动机的涡轮叶片，材料去除量高达70%以上，整体厚度不到2毫米，如果工艺参数调控不好，叶片末端加工变形就会产生超差，而控制变形涉及材料、力学、热力学等学科，这些必须通过基础研究来解决。”该群体成员之一、华中科技大学机械科学与工程学院副院长彭芳瑜说，“我们针对复杂零件、薄壁结构、难加工材料的精密高效加工这一国际性难题，建立了复杂曲面零件高速数控加工动力学模型与精度调控模型，提出了高速铣削稳定性分析全离散法，建立了基于驱动电流的切削力与颤振监测新方法，成功应用于航空高温合金整体叶轮等高效、精密加工，解决了国家重大需求。”

基于华中科技大学机械科学与工程学院自身的优势，该群体面向高性能数字制造装备研制的国家重大需求和世界科技前沿，瞄准高表面完整性、高精度稳定性、高自执行力的科学目标，开展基础理论和先导技术研究。在基础理论研究、技术研发和装备研制方面取得了一系列突破性创新。

无缝衔接：从实验室到生产线

成熟的装备或工艺，往往要理论上反复推演，然后到生产线上检验，再

反馈问题研究改进，经过日积月累、不断迭代优化才能一步步臻于完善。

“但国产装备发展面临一个问题，就是做出来东西没地方用，很多企业不太相信你这个东西能用。”该群体成员之一、华中科技大学教授陈学东说，“这就形成了恶性循环。”

该群体的第一条激光焊接生产线，也是在给某合资品牌车企维修国外生产线时，才逐步获得企业的信任，并在江淮汽车进一步完成技术提升的。

“当时江淮汽车的负责人非常有气魄，给了我们一个试用的机会。”该群体成员之一、华中科技大学教授蒋平说，“我们非常珍惜那次机会，一点点用产品和实力说话，慢慢地，企业发现国产装备性能一点也不差，某些指标还更好，我们的市场才渐渐打开。”

“我们这个群体，可以说从基础研

究到生产实际是无缝衔接。”邵新宇说，“不论时间上还是空间上，我们离生产一线的距离都非常近。在很多项目中，群体成员和企业员工‘同吃同住同劳动’，从生产线到实验室的反馈循环没有时间间隔。”

该群体和多家企业联合，组成了“产学研用”结合、光电多学科交叉的研究团队，建立了“高校研究者专心格物穷理，中试基地不断提升核心技术，终端企业提高应用效能”的协同创新机制。

目前，该群体的基础研究和技术研发成果得到了很好的转化与应用，改变了汽车制造激光焊接、航空叶片高精高效磨削等高端工艺与装备被国外垄断的局面，带动了国产装备的跨越式发展，并推广到航天、航海、芯片、能源等领域。

《中国科学报》：您认为团队取得这样的成绩靠的是什么？

邵新宇：华中科大机械学科上一代科学家，像杨叔子、熊有伦、段正澄、李培根等院士，他们本身就是“大先生”，做人做事做学问方面都是我们的楷模。先生们对我们的要求也是“学术第一、严谨踏实”。有一年大年初一，我和丁汉几个人到熊院士家拜年，老先生正在家中用纸笔推导数学模型。2008年我申请“杰青”时，先生帮我改申请书到凌晨3点。有一次华工激光子公司生产线上出现问题，段院士半夜带人去解决问题，他说“不解决问题睡不着觉”。

《中国科学报》：该群体最大的特点是什么？

邵新宇：一个群体必须有其内在的、精神层面的东西。我们从老一辈科学家那里传承了一种开放的学术交流机制，激发大家的科研灵感。华中科大机械学院有个

“STAR (Striving, Teamwork, Agility, Responsibility)文化”即“自强不息、团结协作、快速反应、尽职尽责”几个英文单词的首字母，这几个单词很好地概括了我们的文化和精神。

《中国科学报》：您认为科学基金在科研人才培养方面起着怎样的作用？

邵新宇：基础研究需要静下心来，十年磨一剑，需要培养一种科学家精神。科学基金在这方面发挥了特别好的作用，它长期稳定的支持可以让研究人员真正地解决一些问题。科学基金有一套严格的考评、交流机制，比如，项目答辩和验收环节，很多同行专家都是现场打分。如果我们的工作没做好，坐在下面压力会非常大。

同时，通过这个创新群体项目，团队中三代科研人员都成长起来，形成了老中青结合的科研梯队。

情系清洁能源的“梦想之群”

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“能量转换材料界面结构与电荷输运性质研究”

■本报记者 甘晓

“好文章不等于好技术，好技术不等于好产品，好产品不等于好市场。”长期致力于锂电池研究的中国工程院院士、中国科学院物理研究所(以下简称物理所)研究员陈立泉对基础研究如何面向产业应用有着深切体会。在他看来，决定一件产品是否受到市场欢迎的因素很多，作为这条完整创新链上的最前端环节，科学家在基础研究中就应当充分考虑可能的市场因素，并从科学上提出解决方案。

多年来，在国家自然科学基金创新研究群体项目“能量转换材料界面结构与电荷输运性质研究”(以下简称创新群体项目)支持下，群体成员用实际工作践行并诠释了陈立泉这一理念。自2015年起，群体成员集结成“梦想之群”，坚持面向国家对清洁能源的迫切需求开展深入研究，从新材料和新表征技术突破，形成从基础研究到产业化的完整创新链。

“我们计划，2015年开始研究材料的体相及界面结构演化规律，探索复杂体系中的离子电子混合输运；2017年建立材料多时空尺度结构与功能的表征平台，实现新材料设计、试制与评价；2020年实现中国品牌的高端能量转化核心材料开发、生产与应用，提高国家竞争力。”这是孟庆波在项目申报时给出的研发路线图和时间表。

“上述目标已经实现了！”经过6年共同努力，孟庆波在结题时充满信心地向评委专家汇报。

核心材料走向市场

多年来，群体成员逐步成长为电池材料领域的领军人才，成员中有5位获得国家杰出青年科学基金项目支持。他们都有着鲜明的科学家性格，既低调务实又敢为人先。在创新群体项目支持下，他们从实际需求中总

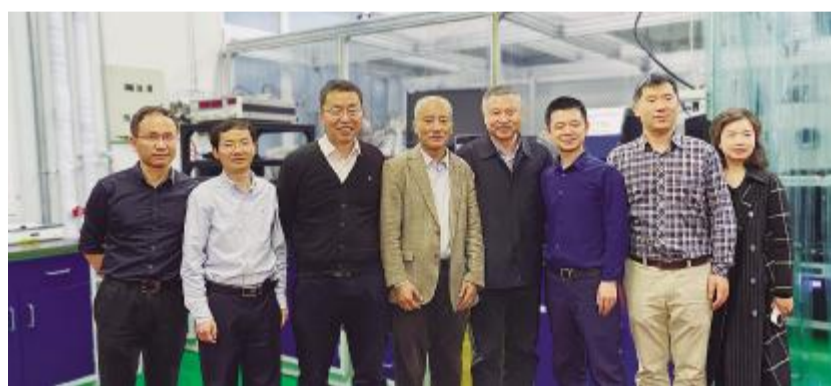
凝练基础科学问题，进行科学攻关，推动了核心能量转换材料的研发。

李泓团队在固态锂离子电池正负极材料的研发方面取得多项重要进展。包括通过多元掺杂，多维度提高材料的结构稳定性；发展超薄固体电解质包覆技术，解决固态电解质与正极和负极颗粒在循环过程中的接触问题。他们研发的具有自主知识产权的纳米硅碳负极材料已从实验室走向了市场。

“在整个研发过程中，我们既要理解电池中的基础科学问题，又要了解实际技术问题并提出实用的解决方案。只有理论与实践并重、原始创新，才有可能推动电池材料学科和技术的发展。”接受《中国科学报》采访时，李泓总结道。

基于上述积累，他们创办天目先导电池材料科技有限公司。如今，具有自主知识产权的纳米硅碳负极材料已经量产，年产量达到一个亿以上。同时，高能量密度固态锂离子电池也实现量产，年产量超过一亿元。

经过多年基础研究，2020年，胡勇胜团队在国际上首次设计一种低成本、高稳定、环境友好的铜基层状氧化物钠离子电池的正极材料。相关研究论文在《科学》上发表。



2021年3月，全体群体成员与团队研究人员开展学术交流后合影，左一至左五为禹习谦、胡勇胜、李泓、孟庆波、白雪冬，右二为谷林。

受访者供图

结凝练基础科学问题，进行科学攻关，推动了核心能量转换材料的研发。

李泓团队在固态锂离子电池正负极材料的研发方面取得多项重要进展。包括通过多元掺杂，多维度提高材料的结构稳定性；发展超薄固体电解质包覆技术，解决固态电解质与正极和负极颗粒在循环过程中的接触问题。他们研发的具有自主知识产权的纳米硅碳负极材料已从实验室走向了市场。

“在整个研发过程中，我们既要理解电池中的基础科学问题，又要了解实际技术问题并提出实用的解决方案。只有理论与实践并重、原始创新，才有可能推动电池材料学科和技术的发展。”接受《中国科学报》采访时，李泓总结道。

基于上述积累，他们创办天目先导电池材料科技有限公司。如今，具有自主知识产权的纳米硅碳负极材料已经量产，年产量达到一个亿以上。同时，高能量密度固态锂离子电池也实现量产，年产量超过一亿元。

经过多年基础研究，2020年，胡勇胜团队在国际上首次设计一种低成本、高稳定、环境友好的铜基层状氧化物钠离子电池的正极材料。相关研究论文在《科学》上发表。

胡勇胜告诉《中国科学报》，“这一成果正是得益于先进的科学计算方法，不仅让我们比传统实验方法更加高效地获得了新型材料，还为预测一系列新材料提供了理论指导。”目前，他们与中科海钠公司联合推出首辆钠离子电池电动车和1兆瓦时钠离子电池储能电站。

为推动薄膜太阳能电池走向市场，孟庆波团队紧紧围绕高效率、高稳定、低成本三个指标开展工作。他们制备的有机无机杂化钙钛矿太阳能电池的效率达到24.5%；研制的全无机钙钛矿太阳能电池效率达到21%，是目前国际最高效率；开发了柔性的全碳电极材料和薄膜制备技术，实现了大面

积极成本碳对电极的制备，让全碳对电极的钙钛矿薄膜太阳能电池的效率达到23.2%，处于世界领先水平。这些工作为高性价比的新型钙钛矿薄膜太阳能电池走向市场奠定坚实基础。

先进材料表征技术平台建设

材料科学发展到今天，早已过了凭借一个课题组单打独斗就能成功的阶段，集智攻关、团结协作必不可少。建立材料的结构与性能之间的关系是设计和制备新材料的前提，而表征材料在使役状态下的原子级分辨率结构与性能的关系是材料研究领域的前沿课题，也是该创新群体项目的重要攻关方向。

白雪冬向《中国科学报》介绍，他带领团队发展了可以看到单个原子运动轨迹的表征技术，并率先观察到了氧化铈材料中氧的单原子分辨动态成像。谷林团队则发展了原位电场下原子尺度表征技术，并率先将原子尺度的原位电镜方法学扩展至三维原子尺度，从三维角度揭示了隐藏在二维结构观测背后的新现象，首次在原子尺度上观察到正极材料中锂离子迁移现象。“我们力争在电子显微学方向达到卓越。”谷林告诉《中国科学报》。

由群体中最年轻的成员、物理所研究员禹习谦领导的团队，利用原位同步辐射光谱技术首次从实验上直

接证实了富锂锰基材料中的氧变价及其演化。“前辈们对事业的热爱和执着源于他们的使命感和责任感，激励着我在科研工作中坚持脚踏实地、求真务实、精益求精。”禹习谦对《中国科学报》说。

目前，李泓、禹习谦等负责建设与运行管理的中国科学院与北京市共建的“清洁能源材料测试诊断与研发平台”已经通过验收，并向全国开放。此外，孟庆波负责的国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项“可调控的瞬态光电测试系统”进展顺利，如今已经部分对外开放。

这些先进的表征方法与技术的研发，促进并支撑了该创新群体项目的能量转换材料研发工作。

总之，无论是新材料研发还是新表征技术，群体成员都在各自的学术领域争取做到极致。每个人都有自己的梦想——孟庆波希望“让阳光造福社会，让世界充满温暖的阳光”；李泓希望“把电池做到极致”；白雪冬希望“与原子共舞”；胡勇胜希望“率先实现钠离子电池的产业化”；谷林想要“看见电子”；禹习谦立志“打造电池‘三甲医院’”。

“正是这些梦想，共同诠释并践行陈立泉先生当年创建这一方向的梦想——电动中国。”孟庆波表示。

面向未来，他们相信，“梦想之群”的梦想就在眼前。

孟庆波：感悟到了执着和坚持的价值，感悟到了团结协作的力量；最大的收获是把以陈立泉先生为代表的老一代科学家的情怀和理念传承下来，把年轻一代都培养成为科技领军人才。对未来，我们有信心为国家实现碳达峰、碳中和目标贡献我们的力量。

《中国科学报》：项目执行过程中有什么感悟、收获和对未来的展望？

孟庆波：材料从基础研究到产业化，要经历材料本身性能的评价、组装电池后的性质变化及其在组装过程的相互影响，以及电池服役状态下的性质变化等，还要经过小试、中试。每一个环节都面临各种技术问题，需要认真分析并凝练隐藏在这些问题中的深层次科学问题并进行协同攻关。我们相信，只要用心去做，问题就能解决！

《中国科学报》：项目执行过程中有什么感悟、收获和对未来的展望？

孟庆波：感悟到了执着和坚持的价值，感悟到了团结协作的力量；最大的收获是把以陈立泉先生为代表的老一代科学家的情怀和理念传承下来，把年轻一代都培养成为科技领军人才。对未来，我们有信心为国家实现碳达峰、碳中和目标贡献我们的力量。